心理科学进展　2019, Vol. 27, No. 2, 209–220
Advances in Psychological Science　DOI: 10.3724/SP.J.1042.2019.00209

第二语言学习与脑可塑性*

程凯文[1,2]　邓颜蕙[3]　颜红梅[1]

([1] 电子科技大学生命科学技术学院神经信息教育部重点实验室，成都　610054)
([2] 西南交通大学外国语学院，成都　611756) ([3] 成都工业学院外语系，成都　611730)

摘　要　脑可塑性指人脑会因为环境刺激、认知需求和行为经验而产生功能或结构改变。近 10 年来的单双语者对比和语言训练研究结果表明，不论儿童、青年或老年人，第二语言学习和使用都能改变其脑运行模式并带来相应结构变化，包括灰质(GM)体积和白质(WM)密度增加，且长期持续的双语经验还能形成认知优势，帮助抵制由老化导致的负面认知影响。基于脑可塑性概念及其研究证据，从双语经验与语言训练两方面，对比分析了长期和短期第二语言学习引起脑功能或结构变化及其内在机制，并对未来相关研究进行了展望。

关键词　第二语言学习；脑可塑性；双语效应；语言训练
分类号　B842; B845

1　引言

外界环境和经验会引起人脑功能改变或结构重组，这一现象被称为脑可塑性或神经可塑性(Neural Plasticity，区别于认知可塑性)，一般可分为功能可塑和结构可塑(Draganski et al., 2004)。功能可塑性指某一脑区的功能发生变化或由临近的脑区代替，一般表现为特定区域激活降低、非特定区域激活加强，亦或是神经网络改变。结构可塑性是指大脑内部神经元数目增多，神经元之间联接增强或减弱，表现为脑容量、灰质(Grey Matter)和白质(White Matter)等指标的变化。两种可塑性可能互相影响，互为触发，共同导致行为出现有益或有害的后果(王瑞明，杨静，李利, 2016)。

脑可塑性最初来源于脑损伤研究。人脑发生病变的区域所承担的功能可以在学习或训练后得到部分恢复，或由邻近区域补偿。例如，大脑因中风、外伤等原因受损后，其受损部位的功能向其他区域转移(Starkey & Schwab, 2014)；先天失明者在指读布莱叶盲文时会激活视区神经(Sadato, 2005)；儿童时期被切除左半球的病人仍然能达到正常人相似的语言水平等(Liégeois et al., 2004)。另一方面，不少来自于技能、运动、音乐等领域的证据表明，健康成年人的大脑仍然有较大的可塑性。例如，伦敦街头出租车司机由于经常搜索路线，负责空间加工的海马体积增大(Maguire et al., 2000)；仅 2 小时左右的空间记忆学习训练能使海马和海马旁回的白质密度增大(Sagi et al., 2012)；3 个月的抛球杂耍训练能让学习者负责运动信息存储与加工的脑区出现灰质显著增长(Draganski et al., 2004)。又如，电脑游戏、音乐训练等也能导致大脑结构和功能迅速变化(Du & Zatorre, 2017; Gong et al., 2015)。最近，第二语言学习对于人脑结构和活动方式的影响，也受到语言学家和神经科学家的特别重视，因为它虽无抛球杂耍训练强烈，但比游戏和音乐训练更加频繁、更持久。

传统观点认为，同母语一样，第二语言也存在所谓的“关键期”，一旦错过，学习将变得非常困难，对大脑功能和结构的影响也不会很大。但是，随着电生理(如事件相关电位 ERP，一种在头皮记录到特殊脑诱发电位)和脑成像技术(如功能核磁共振 fMRI)的运用，越来越多的研究表明，成年人甚至老年人的脑仍然有难以想象的可塑性，学习第二语言也能达到母语或近似母语的行为与

收稿日期：2018-03-16
* 国家自然科学基金(61773094, 61573080)、国家社会科学基金(15BYY068)、四川省应用心理学研究中心面上项目(CSXL-172007)资助。
通信作者：颜红梅, E-mail: hmyan@uestc.edu.cn

神经模式，并可能产生“双语优势” (Bialystok, Craik, & Luk, 2012; Costa & Sebastián-Gallés, 2014; Diamond, 2010; Li, Legault, & Litcofsky, 2014)。近年来，国内不少学者从双语认知效应(何文广，陈宝国，2011；李莹丽，吴思娜，刘丽虹，2012；程凯文，邓颜蕙，尧德中，2014；倪传斌，2015)或双语切换机制(杨静，2016；孙逊，谢久书，王瑞明，2017；常欣，白鹤，王沛，2017)等角度对第二语言认知神经机制作过较深入的探讨。但是，除个别较早研究外(李妍妍，丁国盛，2007)，鲜有从脑可塑性角度来讨论第二语言学习对脑的影响，且大部分只重视横断研究(单双语者对比)，而对一些颇有价值的纵向研究(如语言训练)关注不够。因此，本文将基于脑可塑性概念及相关研究证据，从长期双语经验和短期语言训练两方面，系统探讨第二语言学习与大脑功能和结构之间的内在联系，洞悉人类语言习得神经机制，深化对脑可塑性的认识，为未来语言脑神经科学研究提供有力的支持。

2 双语经验与脑可塑性——横断对比研究

单语者经过较长时间的二语学习(10 年以上或终身)，成为早期或晚期双语者，其脑在运行过程中发生了哪些变化？是否产生了解剖学变化？为回答这些问题，绝大部分研究者采用了横向对比研究，即在同一时间，控制智力、年龄、经济地位、教育等背景因素，对比分析双语者和单语者在静息态或任务态(执行某种认知任务)条件下的脑功能和结构组间差异。下面我们将从语言内和语言外两个方面探讨目前采用此研究方法所获得的部分研究证据。

2.1 双语效应对一语脑加工模式的影响

行为研究表明，和单语者相比，双语者可能具有语言流畅性较差、词汇量小、更多“舌尖现象”(话到嘴边却说不出来)等所谓的“双语效应”。众多脑成像研究试图发现并确认这些效应的神经机制，虽有不少成果，但结论仍存在较大争议。

首先，有研究者认为，双语导致个体传统语言区效率下降，双语者的优势是能灵活利用更多单语者未充分利用的一般认知控制区域来补偿。例如，和单语者相比，双语者在语言理解任务中左下额叶皮层(IFG)激活增加(Kovelman, Shalinsky, Berens, & Petitto, 2008)。该区域也被称为“双语神经标签” (bilingual signature)，是最重要的语言加工区域之一，负责词汇检索、发音规划、形态句法加工等。它的激活增强可能说明双语者在处理语言任务时需要更多认知资源，语言区域认知负荷增大，毕竟他们在任一种语言上都比单语者的使用量要少。又如，二语为正字法深度高(orthographic depth，即形−音一致性低，后文有更多介绍)的双语者在用第一语言阅读时，由于受二语加工习惯的影响，负责认知控制的左前额叶皮层(PFC)激活增加(Nosarti, Mechelli, Green, & Price, 2009)。另外，Abutalebi 和 Green (2008)让德语−法语双语者分别在母语和双语环境下进行图片命名任务，发现，即使使用母语，与单语环境相比，其在双语环境下的左尾状核(LCN)和左前扣带区域(ACC)有更强的激活。研究者认为，双语者在语言处理过程中面临更大的监控压力，为区分同时激活的两种语言形式，势必需要更多一般认知控制区域的参与。

然而，这种观点遭到不少研究者反驳。他们质疑前人实验设计中涉及两种语言任务而掺杂语言转换状态(language switch)，造成结果不够“纯洁”。Parker 等(2012)对比分析了各种熟练早期双语者(一语相同，二语不同)与单语者在一语环境下执行多项语言任务时的大脑活动，发现只在涉及语言产出任务中(例如图片命名和大声朗读)双语者左半球五个语言相关脑区激活增大(中央前回后部，额下回三角部，岛盖部，颞上回和颞极)，而在语言理解(阅读)任务中没有明显差异。然而，在增加命名任务和阅读任务的难度后，单语者相同的五个区域也出现了相似的激活增加。同样，Palomar-García 等(2015)让西班牙−加泰罗尼亚语双语者和西班牙单语者只用西班牙语执行听觉词汇检索(理解)和图片命名任务(产出)，也发现单语者和双语者只在图片命名任务中脑激活模式有差异，在简单的词汇检索任务中没有差异。另外，Román 等(2015)利用相同实验设计让被试执行比词汇检索难度大的句子理解任务，发现双语者语言相关区域有更多激活，如左颞上回和颞中回，但在经常报道的“双语神经标签” (IFG)区域没有明显差异。因此，研究者们认为，双语与单语的主要区别可能只在于双语者面临的语言加工需求增加，而非利用了更多的额外脑区。双语者一语加

工中更多脑区激活也并不意味其一语加工模式发生了变化, 可能仅仅是一语加工(难度较大的语言产出任务)顺带激活了二语而已。

鉴于以上结论的不一致, 最近有研究者开始质疑这种从某(几)个脑区出发的研究思路, 而主张从脑网络(brain network)的角度来探讨单双语的区别。他们认为, 两种语言可能具有相同的神经基础, 只是处理一语和二语的功能网络不一样, 且二语功能网络涉及的区域可能更多、更分散(Xu, Baldauf, Chang, Desimone, & Tan, 2017)。当然, 我们认为, 这两个网络也会有很大重合, 重合的程度及范围可能受到众多因素的影响, 如二语习得年龄(AOA)、二语熟练度、任务类型及难度, 甚至语言种类和相似度等。例如, 一项双语脑成像元分析研究(1998~2014)发现: 二语习得年龄越晚, 一语与二语的网络重合度越小; 早期双语者加工一语时左梭状回(left fusiform gyrus, 对形状敏感, 如面孔、文字等)激活更多, 其原因可能是两种文字正字法共同激活更大(一语启动二语词形)。另外, 该研究还首次提出, 二语与一语的正字法深度差异决定了二语的脑激活模式: 与一语相比, 二语正字法相对深度越低(即形−音一致性越高), 大脑中负责音位加工的双侧听觉区域和负责知觉运动区域的中央前回激活更多, 反之, 二语的形−音一致性越低, 大脑形−音映射任意性越大, 则更多涉及认知控制区域如左前额叶的激活(Liu & Cao, 2016)。

综上, 即使双语者在只使用第一语言的情况下, 二语经验对于其语言加工脑激活模式仍有着一定程度的影响。但我们认为, 除非第二语言的广泛使用而导致一语的磨蚀(language attrition)或彻底流失(Pallier et al., 2003), 否则这种影响不会使一语处理方式发生根本变化。鉴于此, 当遇到“同时接触两种语言的婴儿语言习得会不健全”或“双语者比单语者更聪明”等一些关于双语的误解时, 我们要保持清醒的认识。

然而, 毫无疑问, 第二语言学习在语音加工方面给母语带来明显正面的影响。例如, 有电生理实验证明, 和单语者相比, 早期熟练双语者对复合音表现出了较强的听觉脑干响应(cABR), 即一般听觉处理能力增强(Krizman, Marian, Shook, Skoe, & Kraus, 2012), 这与后文双语者听觉皮层(Heschl’s gyrus, HG)具有更大灰质体积的发现一致(Ressel et al., 2012)。

2.2　双语对执行控制功能的影响

同样, 由于语言处理需求增加, 其他非语言认知活动势必也受到第二语言的影响, 例如, 冲突解决、注意、抑制控制、认知切换等。其中, 执行控制功能(或简称认知控制)是目前双语认知效应研究的热点。首先, 有证据表明, 早期双语不仅会改变某些脑区在一般认知控制中的行为表现, 而且会引发相应脑功能变化。例如, 在处理非语言任务转换时, 单语者激活的脑区仅为一般执行控制区域(右下额叶和前扣带回), 而双语者激活的脑区不仅有一般执行控制区域, 还包括传统的语言区域(左前额叶和左纹状皮层) (Garbin et al., 2010)。其次, 双语者似乎在冲突监控任务中使用了较少的认知资源, 例如, 前扣带皮层脑部活动减少(Abutalebi et al., 2011)。其实, 前额叶皮层和前扣带回区域对两类认知活动都很重要, 是语言控制和一般认知控制功能的重叠(Branzi, Della, Canini, Costa, & Abutalebi, 2015)。具体来说, 左前额叶在语言控制和认知控制任务中有相似激活, 它的角色可能是任务类型的选择; 前扣带回作为监管注意中枢, 在语言加工中负责排除无关信息的干扰, 调节认知资源的分配(王瑞明, 杨静, 李利, 2016)。

值得一提的是, 双语影响认知老化正成为新的研究热点(Cheng, Deng, Li, & Yan, 2015)。Gold, Kim, Johnson, Kryscio 和 Smith (2013a)通过对比老年双语和单语被试在知觉转换任务表现, 发现老年双语者左前额叶皮层和前扣带皮层激活明显比单语者弱, 这与上文有关年轻双语者的研究结果一致(Abutalebi et al., 2011)。由此可见, 虽然认知控制效率随年龄增大而出现衰退, 但语言转换、选择等特有的语言行为可以有效促进双语者干扰抑制能力的发展, 提高冲突监控能力, 而这些能力正是“认知储备”概念的核心内涵(Branzi, Calabria, Boscarino, & Costa, 2016; Costa & Sebastian-Galles, 2014)。鉴于此, 一个个当时令人震惊并引起媒体关注的流行病理学或脑成像研究结果, 现在看来也理所当然。例如, 双语可以推迟老年人神经退行性疾病(如阿尔茨海默症)的临床症状长达 4~5 年(Alladi et al., 2013; Bialystok, Craik, & Freedman, 2007; Craik, Bialystok, & Freedman, 2010; Chertkow et al., 2010; Gollan, Salmon, Montoya, &

Galasko, 2011; Woumans et al, 2015)。另外, Alladi 等(2016)发现中风后认知功能恢复正常的双语病人比例是单语病人比例的两倍, 且患永久性认知障碍的概率要比单语者明显要小。因此, 他们认为, 是否双语可作为中风后认知状况预测的一个独立指标。然而, 他们还发现双语并不能影响失语症发生的概率, 这从一个侧面印证了上文判断: 双语认知优势可能不在于语言能力本身, 而在于长期语言转换所导致的执行控制功能增强。

同样, 不少直接针对痴呆症患者的脑成像研究发现, 双语并不能抵制疾病本身, 而是更大"认知储备"起了作用, 即双语者能忍受更多的脑萎缩或结构改变而不表现症状, 并能保持与较少脑萎缩的单语者相当的认知水平。Schweizer, Ware, Fischer, Craik 和 Bialystok (2012)通过计算机断层扫描技术(CT)研究了双语经验和 AD 病理学发展的关系, 发现在其它相关因素得到较好匹配的情况下, 双语被试 AD 相关脑区的萎缩规模比单语者显著增大。Perani 等(2017)用正电子发射断层显像测量大脑区域葡萄糖代谢技术(FDG-PET), 追踪了多种 AD 患者个体的脑新陈代谢状况和神经连接特征。他们也发现, 同等条件下, 双语患者的脑代谢状况更为严重, 但其执行控制网络(Executive Control Network)和默认网络(Default Mode Network)连接性却增强。

然而, 双语与老化的关系非常复杂, 不是单纯的执行控制功能所涵盖。据现有文献, 双语者在老化中优于单语者的脑区, 除左侧前额叶皮层和前扣带皮层外(Gold, Johnson & Powell, 2013), 还有双侧顶下小叶(Abutalebi, Canini, Della Rosa, Green, & Weekes, 2015)、左前颞叶(Abutalebi, Canini, Della Rosa, Sheung, Green, & Weekes, 2014)、左海马(Li et al., 2017)以及胼胝体(Luk, Bialystok, Craik, & Grady, 2011)等。其中左前颞叶、海马和胼胝体不属于一般意义上的认知控制脑区, 但他们都属于语言网络和老化涉及网络的重叠区域, 因而也是双语者更有效抵御认知老化的重要生理基础(Cheng et al., 2015)。

2.3 双语经验对脑结构的影响

功能性改变应该有其生理基础, 表现为突触水平上的改变或特定脑区结构的变化。目前, 不少来自于健康个体的证据显示, 二语会导致一系列脑区结构性改变, 如前额叶、前扣带回、颞顶皮层、海马、尾状核、壳核等。

首先, Mechelli 等(2004)利用基于体素的形态测量技术(VBM)发现, 双语者颞顶皮层区域顶下皮层(IPL)灰质密度比单语者显著增大, 且两者差异的大小受二语习得年龄(AOA)和熟练度共同调节。该区域(包括缘上回, SMG)也被称为"语言天赋区域" (Della Rosa et al., 2013), 与语音工作记忆、语义整合以及语言控制等相关, 其灰质体积或皮层厚度的增加和二语学习(特别是词汇学习)成正相关(Barbeau et al., 2017), 甚至在老年人群中也表现明显(Abutalebi et al., 2015)。其次, 有研究发现, 额下回(IFG)皮层厚度也受 AOA 调节, 特别是作为"双语神经标签"的左额下回(lIFG), 对 AOA 尤为敏感(Kovelman et al., 2008)。Klein, Mok, Chen 和 Watkins (2014)细化双语者的种类(同时双语者, 早期双语者和晚期双语者)后发现, 双语者左额下回皮层厚度增大, 而右额下回(rIFG)皮层厚度减小, 且这种增大和减小都与 AOA 相关。然而, 该研究未发现那些出生于双语环境的双语者(同时双语者)和单语者在相关脑区灰质体积有差异, 这也许呼应了上文 2.1 我们关于单双语者脑功能网络差异的假设, 即两种语言具有同样物质基础, 能同时兼容两种语言, 但一旦母语系统建立, 也许只有主动二语学习才会对大脑进行较大程度的重构。另外, Abutalebi 团队通过 Flanker 任务发现年轻双语者扣带皮层的灰质密度与执行控制任务激活效应有更高的相关(Abutalebi et al., 2011), 通过图片命名任务发现说多语者与语言控制有关的左壳核区域灰质密度比单语者大(Abutalebi et al., 2013)。Ressel 等(2012)等发现双语者听觉皮层(HG)灰质体积更大, 而该皮层灰质体积与二语语音感知能力成正相关(Wong et al., 2007)。此外, Pliatsikas, Johnstone 和 Marinis (2014)发现双语者小脑(cerebellum)灰质体积优势, 改变了过去对小脑功能的认知, 暗示其也参与了二语的加工。

值得一提的是, Zou, Ding, Abutalebi, Shu 和 Peng (2012)发现汉语晚期手语学习者的左尾状核(LCN)灰质密度比未学者要大得多, 这是迄今为止首次关于不同模态的双语影响脑结构的证据。左尾状核和上文提到的左壳核共同构成基底核(BG)的主要成分, 在监视和控制语言、抑制干扰中扮演重要角色。最近, Li 等(2017)也在老年双语者中发现, 不管是掌握两种语言口语的单模态双

语者，还是掌握一种语言口语和另一种语言手语的双模态双语者，都具有相关双侧前颞叶(ATL)、左海马以及左脑岛的灰质密度增大的现象。该发现重复了另外两个老化研究结果(Abutalebi et al., 2014; Olsen et al., 2015)，共同验证这些区域也在二语抵御认知老化过程中起重要作用：前颞叶与词汇语义加工加工有关，该区域损伤会出现找词困难甚至词义性痴呆；左脑岛与手语和发音有关；海马与长时记忆的形成和检索有关，其萎缩可能是正常认知老化到痴呆症的转折点(Li et al., 2014)。因此，我们认为双语认知优势可能不受语言模态的影响，但个别研究报道了相反的结果(Emmorey, Luk, Pyers, & Bialystok, 2008)，未来需要更多的探索。

同灰质比较，二语影响脑白质的研究要少很多，且结果不统一。Luk 等(2011)利用弥散张量成像技术(DTI)发现健康双语老年人(70 岁)围绕胼胝体及其周围区域的神经束比单语者拥有更大的白质密度，但 Gold 等(2013b)发现，老年双语者的相关区域白质密度比单语者要小(且灰质不存在差异)。造成两研究结论冲突的原因可能是被试个体差异(病理状态差异)，上节 Schweizer 等(2012)和 Perani 等(2017)的结论可以解释。同样，这种个体差异也在双语儿童和青年人的研究中重现。Mohades 等(2012)发现，双语儿童(M = 9 岁)左额枕下束(lIFOF)白质密度更大。Cummine 和 Boliek (2013)得到不同的结果，成人双语者(M = 24 岁)右额枕下束(rIFOF)和前部丘脑辐射(ATR)的白质密度均比单语者(M = 29 岁)要小。究其矛盾的原因，一种可能是白质完整性具有大脑左右半球差异，另一种可能是纤维束的种类和区域与二语起始年龄之间存在着较复杂的交互作用。然而，Pliatsikas, Moschopoulou 和 Saddy (2015)发现，无论二语种类和学习时间长短，也不论是早期还是晚期双语者，其几个语言处理相关的纤维束(包括双侧 IFOF)白质密度都比单语者大。Rossi, Cheng, Kroll, Diaz 和 Newman (2017)也在晚期英语−西班牙双语者身上印证了这个结果，不过他们仍然发现 FA (Fractional anisotropy，数值越大，白质完整性越好)的数值和二语习得年龄相关。另外，结构网络研究同样重复了矛盾的结果。García-Pentón, Fernández, Iturria-Medina, Gillon-Dowens 和 Carreiras (2014)基于结构 MRI 数据，结合网络算法(network-based statistics，图论)，发现双语者两个由白质神经束连接的语言加工和监控子网络(左额叶到颞顶叶皮层，左枕叶到颞顶皮层或左枕叶到右额上回)连接强度更大，但全网络效率比单语者要低。因此，个体差异、年龄、不同研究方法都有可能导致结果的不一致(Luk & Pliatsikas, 2016)。然而，最近 Anderson 等(2018)似乎解决了以上研究结果的争议，他们先复制了 Gold 等(2013b)的结果，找到不一致的原因，然后在更严格匹配或控制诸混淆变量(智商、教育、性别、年龄和精神状态等)基础上，仍然发现老年双语者的左侧上纵神经束上的白质密度较单语者要大，支持了 Luk 等(2011)、Mohades 等(2012)、Pliatsikas 等(2015)和 Rossi 等(2017)的正面结论。

总之，目前大部分横向研究证据表明，和单语者相比，主动学习或长期使用第二语言，都能增加语言和一般认知控制(包括语言控制)区域的灰质体积或白质密度，为相关脑区功能增强并抵抗老化提供了物质基础。

3　语言训练与脑可塑性——纵向研究

长期以来，单双语对比研究因为众多混淆因素而使结果备受质疑，例如社会经济地位、教育水平、移民状况以及不同的“双语”定义等。纵向语言训练理论上能更好控制各项混淆因素，可以得出一些有关可塑性的因果性结论。其思路是要求被试在实验室或近似实验室环境中(短期沉浸式学习)进行较短时间的新语言学习或训练，并观察其大脑变化。一般采用前测−后测模式，其流程一般是：在新语言学习训练前后，要求被试完成两次相似语言或非语言任务，分别记录两次脑活动模式，同时，在学习前后设置基线任务，分析比较两种任务条件下前后两次所得图像的差异，揭示由训练所引起的脑功能或结构变化(李妍妍，丁国盛, 2007)。

3.1　语言训练对脑运行方式的影响

首先，成年人语音系统并非完全失去可塑性，其二语语音感知或产出能力仍然具有逐步提升的可能。不少干预研究发现，语音训练可以突破学习者的母语干扰，显著提高其神经可塑性。例如，Zhang 等(2009)利用计算机合成软件 IDS (Infant Directed Speech)帮助日本英语学习者准确区分最难掌握的英语语音/r/和/l/。结果表明，被试的语音

辨别能力以及大脑对这两个音的敏感度和处理速度都明显提高。类似的方法也被成功应用到对中国英语学习者的语音干预研究中。训练后被试对较难掌握的目标音感知能力显著提高，其大脑对于偏差音产生了明显 MMN 脑电成分(与自动信息加工有关的失匹配负波, Cheng & Zhang, 2013)。又如, Wang, Sereno, Jongman 和 Hirsch (2003)利用 2 周时间来训练美国大学生学习汉语语调，发现被试行为表现与其左颞上回皮层激活程度明显相关，且训练前没有激活的脑区(左脑 BA42 和右脑 BA44)训练后得到额外激活。另外, Shtyrov, Nikuli 和 Pulvermüller (2010)则通过“死记硬背训练法”证明了大脑听觉可塑性。他们让被试短时间(14 分钟)多次重复听一个假词发音(如，基于真词 pipe 构造 pite)，被试开始时(20 次)大脑会出现差异脑电波，但在连续听假词约 160 次后所得波形与听真词引发波形几乎无差异。

其次，语义训练同样成果丰富。Mclaughlin, Osterhout 和 Kim (2004)跟踪英语母语者为期一年的法语(单词词义)课堂学习，并在不同阶段通过词汇判断任务考察其 N400 (与语义加工有关的脑电成份)的变化。结果发现，学习 14 小时(2 周)后被试行为上虽不能辨别真假词，但已出现显著 N400，在 140 小时(9 个月)后，被试加工真假词差异就与法语母语者一样了。这表明大脑加工新词比行为表现更加敏感，其语义自动化程度在短期内能迅速提高，逐渐趋同于母语加工模式。Stein 等(2012)利用 fMRI 跟踪研究了一组赴瑞士学习的英语交换生德语水平提高与其大脑功能变化之间的关系。结果表明，在语义加工任务中，同首日相比，5 个月后被试前额叶区域(PFC)二语和一语的激活差异减小。又如，Barbeau 等(2017)追踪了英语单语者(12 周)法语强化训练后的脑活动变化，训练前后分别用英语和法语执行句子阅读任务。结果表明，只有在新语言情况下脑活动才有变化：培训后左顶下小叶(IPL)以及缘上回(SMG)比培训前激活增加，且与句子阅读速度的提高成正相关。该研究进一步确认了颞顶皮层在二语学习中的重要作用，也同双语者该区域具有更大灰质密度的结果一致(Mechelli et al., 2004)。Grant, Fang 和 Li (2015)通过对学习西班牙语的美国大学生进行一年的追踪后发现，随着二语熟练水平的提升，学习者认知控制中枢(如前扣带回)的激活明显减少，而其与语义加工的重要脑区(如颞中回)联系增加。这个结果和上文双语影响执行功能相关研究一致(Abutalebi et al., 2011; Branzi et al., 2015)，揭示了第二语言学习者认知控制网络与语言加工网络之间的动态转换以及二语熟练度的调节作用。最近，Bartolotti, Bradley, Hernandez 和 Marian (2017)同样利用英语单语者进行短时间西班牙语词汇训练后发现，在单语言听觉理解任务下，二语词汇和母语词汇激活的脑区不同，二语更多激活海马，而母语更多激活顶叶后部；在跨语言语音识别任务下，二语词汇加工时左海马激活下降。该研究除了确认左海马在二语学习中的重要作用外，也说明人脑从开始学习二语时就伴随母语的干扰和竞争。

另外，也有不少研究从脑网络角度追溯了二语改变大脑功能的影响因素，如个体差异、学习方式等。Veroude, Norris, Shumskaya, Gullberg 和 Indefrey (2010)要求荷兰语单语者通过观看中文字幕天气预报视频进行汉字内隐式学习，视频放映前后分别对大脑进行静息态扫描并作脑网络连接分析。结果表明，成绩好的被试双侧缘上回(SMG)之间的连接强度要高于成绩差的被试。Yang, Gates, Molenaar 和 Li (2015)让美国大学生接受为期 6 周的汉语词汇(语音−图片关联)训练，发现成绩好的学生在训练后对学习过的材料进行声调判断任务时自动触发对这些词汇的认知加工，其前额叶运动皮层、额下回、颞上回后部等区域有更强烈激活，与第二语言相关脑区之间的沟通更为紧密，即成绩好的学生脑功能网络更为高效。又如，Yang 和 Li (2012)要求美国大学生接受 20 分钟人工语法学习后(通过指导语操纵隐性或显性学习)进行语法判断任务。研究者发现，两种学习方式不仅脑激活的模式不同，而且脑功能网络也有很大差异：显性学习更多依赖于额叶和脑岛之间的连接，而隐性学习则更多依赖额叶与基底核(BG)之间的连接。此外，Hosoda, Tanaka, Nariai, Honda 和 Hanakawa (2013)在日本大学生英语词汇训练(6 个月)之后发现，其脑右半球的额下回后部−尾状核−颞上回网络联接强度和词汇学习成绩呈现正相关，而左半球则不显著。这可能说明，非熟练二语者学习过程中会更多利用大脑右半球区域神经资源，强化左右脑联系与交流，降低大脑功能偏侧化程度。

最近，国内研究团队特别关注非平衡双英双语者短期双语切换训练的脑可塑性问题。例如，研究者对比双语者 8 天双语切换训练前后的脑电模式发现，和控制组(未经过语言切换训练)相比，实验组 N200 成分潜伏期显著提前。N200 成分被认为和抑制功能相关，这表明短期语言训练可以使学习者通过抑制控制功能快速建立语言任务图式(Kang et al., 2017)。又如，他们在跟踪另一组被试后发现，与训练前相比，在图片命名任务中，被试切换代价明显下降，与抑制控制有关脑区激活显著减弱，且背侧前扣带回(dACC)激活下降的量与切换代价下降的量成正比。进一步 ROI (根据先验模板而划分的感兴趣区域)分析后发现，dACC 的激活在训练材料和未训练材料上都获得同等程度减弱，左侧尾状核(LCN)的激活只在已训练材料上显著降低而在未训练的材料上无变化(Kang et al., 2017)。该结果在前人研究的基础上(Abutalebi et al., 2011; Branzi et al., 2015)，进一步明确了前扣带回与左侧尾状核在语言控制过程中的不同角色：前者涉及领域一般性(domain general)抑制功能，而后者涉及语言特异性(language specific)抑制功能。

3.2 语言训练对脑结构的影响

上文提到，仅 2 小时空间记忆(非语言)训练就能促使学习者海马体积明显增大(Sagi et al., 2012)。那么，语言训练是否也能迅速影响学习者的脑结构呢？以下几项研究给出了肯定的答案。

首先，Kwok 等(2011)在成年汉语被试进行为期 3 天(分 5 次，共计 1.48 小时)的颜色命名训练(人造单词)后发现，被试大脑中与彩色视觉和感知有关的区域(V2/3)灰质体积增加，但语言相关区域无明显变化。该结果暗示成年人的脑具有很强的可塑性，而脑结构对语言训练的耐受时间可能比知觉训练要长。Wong 等(2007)训练英语单语者学习带音调的人造词及语义(图片呈现)仅几周时间，发现所有被试初级听觉皮层(左 HG)灰质体积和其语言任务表现正相关，且成绩好的被试该区域灰质体积更大。这表明短期词汇训练可以显著改变大脑结构，呼应了前文双语者拥有更大听觉皮层的发现(Ressel et al., 2012; Krizman et al., 2012)。另外，Legault, Fang, Lan 和 Li (2018)通过英语单语者约 20 天的汉语词汇训练研究，发现学习方式(环境)对语言控制区域结构的调节。同对照组相比，训练组所有与语言控制网络相关区域都出现皮层厚度和灰质密度的增加，但不同学习方式所依赖的脑区不同：传统图文联想记忆组(PW)更多利用右侧额下回区域(rIFG)，而虚拟现实学习组(VE)主要依靠右侧顶下区域(rIPL)。由此可见，仅几周的语言训练就能产生明显大脑结构变化，那么，较长时间的课堂或沉浸式学习(数月或一年)能够定向“塑造”大脑，也显得无可厚非。

Mårtensson 等(2012)通过零基础青年军队学员为期 3 个月的口译训练研究发现，与控制组相比，实验组左额中回、额上回和颞上回等区域皮层厚度增大；外语学习成绩高的右海马和左颞上回结构变化更加明显；目标明确、努力程度高的学员额中回区域灰质密度增大更显著。同样，Stein 等(2012)通过英语母语者短期德语学习进展研究，不仅发现大脑功能发生变化(见上文)，还发现左额下回(lIFG)和前颞叶区域(ATL)的灰质密度增大和德语水平的提高成正相关。这些结果与上文横向研究发现一致(Klein et al., 2014; Li et al., 2017)。其次，Schlegel, Rudelson 和 Tse (2012)通过对参加 9 个月汉语短训的英语母语者定期大脑扫描后发现，同控制组相比，实验组在连接传统左半球和右半球语言区相关区域的神经束白质密度增强，且最显著变化出现在连接双侧前额叶并贯穿胼胝体的神经束上。该结果也验证了 Luk 等(2011)、Mohades 等(2012)、Pliatsikas 等(2015)、Rossi 等(2017)和 Anderson 等(2018)横向研究结果。另外，Hosoda 等(2013)也发现，和对照组相比，成绩显著提高的被试额下回、尾状核和颞上回附近白质密度显著增加，且增加的程度和他们的英语词汇量成正比。同样，Xiang 等(2015)追踪德语单语者在荷兰为期 6 周的二语培训进展后发现，训练初期被试右半球区域弓形束白质增大，但在训练后期，随着二语熟练度的提高，增多的白质逐步转移到左半球相应区域。该研究不但呼应了上文关于二语熟练度调节双语者脑功能的研究(Grant et al., 2015)，还首次发现短期语言培训能导致脑白质在大脑左右半球间的动态迁移，印证了上文关于双语能促进大脑左右半球交流的判断(Cheng et al., 2015)。

综上，短期语言训练所带来的功能或结构变化与长期双语效应在很大程度上相互呼应。但是，鉴于目前综合功能和结构分析的双语研究缺乏的

现状(Abutalebi et al., 2011; Gold et al., 2013b; Hosoda et al., 2013; Luk et al., 2011), 未来需要进一步探讨第二语言对于脑功能和结构影响一致性的问题。

4 总结及展望

从某种意义上说，人脑有时如同一台计算机，它在被写入一套操作系统(第一语言)之后，硬盘就得分区，形成默认运行网络。该语言反复刺激使默认网络产生“固化”并会拒绝新操作系统(新语言或二语)的写入。然而，神经可塑性却是人脑比计算机更加“智能”的重要原因。第二语言习得和使用会改变大脑固有运行模式或结构，例如，神经元之间轴突或树突的迁移，原始链接的断开和新链接的形成等。这样，大脑原有系统会升级，升级后的新系统可以实现两套操作系统的“兼容”，因而运行速度更快，效率更高。当然，这可能是非同时双语者或晚期双语者的情形，而对于同时双语者来说，则可能一开始写入的就是双系统，因而能够胜任更多功能的操作和运行。

过去 10 年，大量有关双语或语言训练影响脑可塑性的研究证明了我们以上的类比和假设：长期持续使用两种语言似乎对不同大脑皮层和皮层下结构具有普遍的影响。首先，从功能可塑角度看，一方面，第二语言可以在一定程度上改变双语者一语或主导语言的处理过程(特别是语言产出)，表现为传统语言区效率下降(例如左侧额下回)，需更大的脑区激活来监管其语言系统，且可能需要一般认知控制脑区的更多参与。另一方面，长期双语转换会促进执行控制区域的神经功效，使其能够在冲突监控等一般认知任务中节约大脑资源，进而增加认知储备，抵御认知老化。更重要的是，这些功能可塑性在结构层面已部分得到呼应与确认。经常报道的灰质体积(或密度)增加的几个区域，如额下回、前颞叶、初级听觉皮层(HG)、颞上回、顶下小叶(包括 SMG)、海马、尾状核和壳核都是语言加工和处理的关键区域(主要在脑左半球)，其中也包括了双语语言控制和一般认知控制网络的重合节点(如前额叶、扣带回、尾状核、顶下小叶等)。另外，就白质密度(或完整性)来说，前额叶与基底核传递信号能力的增强(如双侧 IFOF)也可能是双语优势的神经表现之一。

然而，目前我们还很难对这些脑区结构性变化与其功能作用之间的关系进行全面而连贯地描述，未来可以在以下几个方向进一步探索：

第一，关于双语认知优势以及双语与认知老化的关系，虽然有少数研究者对此提出质疑(Paap & Sawi, 2014)，但我们仍然乐见将现有成果应用于促进第二语言教与学，推动早期双语教育的开展，并探索二语经验辅助预防、诊断或干预各种语言相关疾病的可能，如老年痴呆症(Klimova, Valis, & Kuca, 2017)、精神分裂症、失语症、自闭症、抑郁症等。

第二，关于目前双语白质研究数量有限且结论互相矛盾的问题(Gold et al., 2013b)，未来需要结合白质和灰质两种研究方法，探讨两者在时间和空间上的一致性。而且，目前结合功能和结构的研究也偏少，功能和结构一致性也是未来需要研究的一个课题。另外，需特别指出的是，目前大多数成果都基于大脑模块化假设，而学习语言实际上是一种高级复杂的认知活动，不一定局限于固定的模块或感兴趣区域(ROI)，而是由不同脑区协同的神经网络来完成。未来双语和脑可塑性研究，不应只关注某个区域激活量或结构的变化，而要构建更细致的语言网络和一般认知控制网络，更全面发掘网络内部及网络之间的互动模式(García-Pentón et al., 2016)。

第三，从时间进程来看，我们认为第二语言学习对人脑的影响是动态的，非线性的。例如，同运动训练效应只能持续三个月的发现一样(Draganski et al., 2004)，Hosoda 等(2013)也发现学习者短期词汇训练后右前额叶容量增大效应在一年后消失，Xiang 等(2015)还发现 6 个月二语训练中被试脑白质在左右半球之间动态迁移。未来需要更长时间跨度的多点(检测)纵向追踪研究，探索大脑结构随二语学习时间或熟练度动态变化的一般规律。

第四，从影响因素来看，二语习得年龄、语言熟练度、语言类型、学习环境或方式以及个体差异等，目前都被认为和脑可塑性差异密切相关，是造成该领域结果不统一的重要原因(García-Pentón et al., 2016; Luk & Pliatsikas, 2016)。但是，对于这些因素是如何影响或如何共同影响脑的可塑性，远没有得到充分了解。除此之外，未来相关研究不可忽视经济、文化背景等间接因素通过语言对人脑施加的影响。

第五，从语言类型来看，国内双语研究刚刚

起步, 与汉语有关的双(多)语脑机制研究亟待加强。一方面, 为服务于我国一带一路的战略, 学好外语促进国际交流的同时, 也要注重汉语的推广, 汉语作为二语的脑机制研究必须跟上(Qi et al., 2015)。另一方面, 为适应我国丰富的多语环境, 促进民族融合, 我们应启动民汉双语、方言双语以及包含手语的双模态双语等特殊形式的双语脑神经机制研究。

参考文献

常欣, 白鹤, 王沛. (2017). 双语者语言切换代价的影响因素. *心理科学进展*, *25*(9), 1469–1478.

程凯文, 邓颜蕙, 尧德中. (2014). 双语 (或多语) 是否有利抵御老年痴呆症?. *心理科学进展*, *22*(11), 1723–1732.

何文广, 陈宝国. (2011). 语言对认知的影响——基于双语认知“优势效应”的分析. *心理科学进展*, *19*(11), 1615–1624.

李妍妍, 丁国盛. (2007). 言语学习引起的脑功能和结构变化. *心理科学进展*, *15*(3), 409–415.

李莹丽, 吴思娜, 刘丽虹. (2012). 双语经验对认知能力的影响. *心理科学进展*, *20*(7), 995–1002.

倪传斌. (2015). 双语的长期效应. *外国语*, *38*(5), 53–62.

孙逊, 谢久书, 王瑞明. (2017). 双语语言转换的神经机制. *外语教学*, *38*(2), 27–32.

王瑞明, 杨静, 李利. (2016). *第二语言学习*. 上海: 华东师范大学出版社.

杨静. (2016). 双语者语言控制的神经机制. *当代语言学*, *18*(4), 604–616.

Abutalebi, D. J., & Green, D. W. (2008). Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. *Language and Cognitive Processes*, *23*(4), 557–582.

Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Gonzaga, A. K. C., Keim, R., Costa, A., & Perani, D. (2013). The role of the left putamen in multilingual language production. *Brain and Language*, *125*(3), 307–315.

Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Green, D. W., Hernandez, M., Scifo, P., Keim, R., ... Costa, A. (2011). Bilingualism tunes the anterior cingulate cortex for conflict monitoring. *Cerebral Cortex*, *22*(9), 2076–2086.

Abutalebi, J., Canini, M., Della Rosa, P. A., Green, D. W., & Weekes, B. S. (2015). The neuroprotective effects of bilingualism upon the inferior parietal lobule: A structural neuroimaging study in aging Chinese bilinguals. *Journal of Neurolinguistics*, *33*, 3–13.

Abutalebi, J., Canini, M., Della Rosa, P. A., Sheung, L. P., Green, D. W., & Weekes, B. S. (2014). Bilingualism protects anterior temporal lobe integrity in aging. *Neurobiology of Aging*, *35*(9), 2126–2133.

Anderson, J. A. E., Grundy, J. G., De Frutos, J., Barker, R. M., Grady, C., & Bialystok, E. (2018). Effects of bilingualism on white matter integrity in older adults. *NeuroImage*, *167*, 143–150.

Alladi, S., Bak, T. H., Duggirala, V., Surampudi, B., Shailaja, M., Shukla, A. K., ... Kaul, S. (2013). Bilingualism delays age at onset of dementia, independent of education and immigration status. *Neurology*, *81*(22), 1938–1944.

Alladi, S., Bak, T. H., Mekala, S., Rajan, A., Chaudhuri, J. R., Mioshi, E., ... Kaul, S. (2016). Impact of bilingualism on cognitive outcome after stroke. *Stroke*, *47*(1), 258–261.

Barbeau, E. B., Chai, X. J., Chen, J. K., Soles, J., Berken, J., Baum, S., ... Klein, D. (2017). The role of the left inferior parietal lobule in second language learning: An intensive language training fMRI study. *Neuropsychologia*, *98*, 169–176.

Bartolotti, J., Bradley, K., Hernandez, A. E., & Marian, V. (2017). Neural signatures of second language learning and control. *Neuropsychologia*, *98*, 130–138.

Bialystok, E., Craik, F. I., & Freedman, M. (2007). Bilingualism as a protection against the onset of symptoms of dementia. *Neuropsychologia*, *45*(2), 459–464.

Bialystok, E., Craik, F. I., & Luk, G. (2012). Bilingualism: consequences for mind and brain. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(4), 240–250.

Branzi, F. M., Calabria, M., Boscarino, M. L., & Costa, A. (2016). On the overlap between bilingual language control and domain-general executive control. *Acta Psychologica*, *166*, 21–30.

Branzi, F. M., Della Rosa, P. A., Canini, M., Costa, A., & Abutalebi, J. (2015). Language control in bilinguals: Monitoring and response selection. *Cerebral Cortex*, *26*(6), 2367–2380.

Cheng, B., & Zhang, Y. (2013). Neural plasticity in phonetic training of the/iI/contrast for adult Chinese speakers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *134*(5), 4245–4245.

Cheng, K., Deng, Y., Li, M., & Yan, H. M. (2015). The impact of L2 learning on cognitive aging. *Admet and Dmpk*, *3*(3), 260–273.

Chertkow, H., Whitehead, V., Phillips, N., Wolfson, C., Atherton, J., & Bergman, H. (2010). Multilingualism (but not always bilingualism) delays the onset of Alzheimer disease: Evidence from a bilingual community. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, *24*(2), 118–125.

Costa, A., & Sebastián-Gallés, N. (2014). How does the bilingual experience sculpt the brain? *Nature Reviews Neuroscience*, *15*(5), 336–345.

Craik, F. I. M., Bialystok, E., & Freedman, M. (2010). Delaying the onset of Alzheimer disease: Bilingualism as a form of cognitive reserve. *Neurology*, *75*(19), 1726–1729.

Cummine, J., & Boliek, C. A. (2013). Understanding white matter integrity stability for bilinguals on language status and reading performance. *Brain Structure and Function*, *218*(2), 595–601.

Della Rosa, P. A., Videsott, G., Borsa, V. M., Canini, M., Weekes, B. S., Franceschini, R., & Abutalebi, J. (2013). A neural interactive location for multilingual talent. *Cortex*, *49*(2), 605–608.

Diamond, J. (2010). The benefits of multilingualism. *Science, 330*(6002), 332–333.

Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature, 427*, 311–312.

Du, Y., & Zatorre, R. J. (2017). Musical training sharpens and bonds ears and tongue to hear speech better. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(51), 13579–13584.

Emmorey, K., Luk, G., Pyers, J. E., & Bialystok, E. (2008). The source of enhanced cognitive control in bilinguals: Evidence from bimodal bilinguals. *Psychological Science*, *19*(12), 1201–1206.

Garbin, G., Sanjuan, A., Forn, C., Bustamante, J. C., Rodriguez-Pujadas, A., Belloch, V., ... Ávila, C. (2010). Bridging language and attention: Brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. *NeuroImage*, *53*(4), 1272–1278.

García-Pentón, L., Fernández, A. P., Iturria-Medina, Y., Gillon-Dowens, M., & Carreiras, M. (2014). Anatomical connectivity changes in the bilingual brain. *NeuroImage*, *84*, 495–504.

García-Pentón, L., Fernández García, Y., Costello, B., Duñabeitia, J. A., & Carreiras, M. (2016). The neuroanatomy of bilingualism: How to turn a hazy view into the full picture. *Language, Cognition and Neuroscience*, *31*(3), 303–327.

Gold, B. T., Johnson, N. F., & Powell, D. K. (2013b). Lifelong bilingualism contributes to cognitive reserve against white matter integrity declines in aging. *Neuropsychologia*, *51*(13), 2841–2846.

Gold, B. T., Kim, C., Johnson, N. F., Kryscio, R. J., & Smith, C. D. (2013a). Lifelong bilingualism maintains neural efficiency for cognitive control in aging. *Journal of Neuroscience*, *33*(2), 387–396.

Gollan, T. H., Salmon, D. P., Montoya, R. I., & Galasko, D. R. (2011). Degree of bilingualism predicts age of diagnosis of Alzheimer's disease in low-education but not in highly educated Hispanics. *Neuropsychologia*, *49*(14), 3826–3830.

Gong, D., He, H., Liu, D., Ma, W., Dong, L., Luo, C., & Yao, D. (2015). Enhanced functional connectivity and increased gray matter volume of insula related to action video game playing. *Scientific Reports*, *5*(3), 9763.

Grant, A. M., Fang, S-Y., & Li, P. (2015). Second language lexical development and cognitive control: A longitudinal fMRI study. *Brain and Language*, *144*, 35–47.

Hosoda, C., Tanaka K., Nariai T., Honda M., & Hanakawa T. (2013). Dynamic neural network reorganization associated with second language vocabulary acquisition: A multimodal imaging study. *The Journal of Neuroscience*, *33*(34), 13663–13672.

Kang, C. Y., Fu, Y. B., Wu, J. J., Ma, F. Y., Lu, C. M., & Guo, T. M. (2017). Short-term language switching training tunes the neural correlates of cognitive control in bilingual language production. *Human Brain Mapping*, *38*(12), 5859–5870.

Kang, C., Ma, F., & Guo, T. (2017). The plasticity of lexical selection mechanism in word production: ERP evidence from short-term language switching training in unbalanced Chinese–English bilinguals. *Bilingualism: Language and Cognition*, *21*(2), 1–18.

Kovelman, I., Shalinsky, M. H., Berens, M. S., & Petitto, L-A. (2008). Shining new light on the brain's "bilingual signature": A functional near infrared spectroscopy investigation of semantic processing. *NeuroImage*, *39*(3), 1457–1471.

Klein, D., Mok, K., Chen, J-K., & Watkins, K. E. (2014). Age of language learning shapes brain structure: A cortical thickness study of bilingual and monolingual individuals. *Brain and Language*, *131*, 20–24.

Klimova, B., Valis, M., & Kuca, K. (2017). Bilingualism as a strategy to delay the onset of Alzheimer's disease. *Clinical Interventions in Aging*, *12*, 1731–1737.

Krizman, J., Marian, V., Shook, A., Skoe, E., & Kraus, N. (2012). Subcortical encoding of sound is enhanced in bilinguals and relates to executive function advantages. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(20), 7877–7881.

Kwok, V., Niu, Z., Kay, P., Zhou, K., Mo, L., Jin, Z., ... & Tan, L. H. (2011). Learning new color names produces rapid increase in gray matter in the intact adult human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(16), 6686-6688.

Legault, J., Fang, S. Y., Lan, Y. J., & Li, P. (2018). Structural brain changes as a function of second language vocabulary training: Effects of learning context. *Brain and Cognition,* in press.

Li, L., Abutalebi, J., Emmorey, K., Gong, G., Yan, X., Feng, X., … Ding, G. (2017). How bilingualism protects the brain from aging: Insights from bimodal bilinguals. *Human Brain Mapping*, *38*(8), 4109–4124.

Li, P., Legault, J., & Litcofsky, K. A. (2014). Neuroplasticity as a function of second language learning: Anatomical changes in the human brain. *Cortex*, *58*, 301–324.

Liégeois, F., Connelly, A., Cross, J. H., Boyd, S. G., Gadian,

D. G., Vargha-Khadem, F., & Baldeweg, T. (2004). Language reorganization in children with early-onset lesions of the left hemisphere: An fMRI study. *Brain*, *127*(6), 1229–1236.

Liu, H. S., & Cao, F. (2016). L1 and L2 processing in the bilingual brain: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Brain and Language*, *159*, 60–73.

Luk, G., Bialystok, E., Craik, F. I. M., & Grady, C. L. (2011). Lifelong bilingualism maintains white matter integrity in older adults. *Neuroscience, 31*(46), 16808–16813.

Luk, G., & Pliatsikas, C. (2016). Converging diversity to unity: Commentary on the neuroanatomy of bilingualism. *Language, Cognition and Neuroscience*, *31*(3), 349–352.

Maguire, E. A., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackoweiak, R. S. J., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of National Academy of Sciences, 97*(8), 4398–4403.

Mårtensson, J., Eriksson, J., Bodammer, N. C., Lindgren, M., Johansson, M., Nyberg, L., & Lövdén, M. (2012). Growth of language-related brain areas after foreign language learning. *NeuroImage*, *63*(1), 240–244.

McLaughlin, J., Osterhout, L., & Kim, A. (2004). Neural correlates of second-language word learning: Minimal instruction produces rapid change. *Nature Neuroscience*, *7*(7), 703–704.

Mechelli, A., Crinion, J. T., Noppeney, U., O'doherty, J., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Price, C. J. (2004). Neurolinguistics: Structural plasticity in the bilingual brain. *Nature*, *431*(7010), 757–757.

Mohades, S. G., Struys, E., Van Schuerbeek, P., Mondt, K., Van De Craen, P., & Luypaert, R. (2012). DTI reveals structural differences in white matter tracts between bilingual and monolingual children. *Brain Research*, *1435*, 72–80.

Nosarti, C., Mechelli, A., Green, D. W., & Price, C. J. (2009). The impact of second language learning on semantic and nonsemantic first language reading. *Cerebral Cortex*, *20*(2), 315–327.

Olsen, R. K., Pangelinan, M. M., Bogulski, C., Chakravarty, M. M., Luk, G., Grady, C. L., & Bialystok, E. (2015). The effect of lifelong bilingualism on regional grey and white matter volume. *Brain Research*, *1612*, 128–139.

Paap, K. R., & Sawi, O. (2014). Bilingual advantages in executive functioning: Problems in convergent validity, discriminant validity, and the identification of the theoretical constructs. *Frontiers in Psychology*, *5*, 962.

Pallier, C., Dehaene, S., Poline, J.-B., LeBihan, D., Argenti, A.-M., Dupoux, E., & Mehler, J. (2003). Brain imaging of language plasticity in adopted adults: Can a second language replace the first? *Cerebral Cortex*, *13*(2), 155–161.

Palomar-García, M-Á., Bueichekú, E., Ávila, C., Sanjuán, A., Strijkers, K., Ventura-Campos, N., & Costa, A. (2015). Do bilinguals show neural differences with monolinguals when processing their native language? *Brain and Language*, *142*, 36–44.

Parker Jones, Ō., Green, D. W., Grogan, A., Pliatsikas, C., Filippopolitis, K., Ali, N., ... Price, C. J. (2011). Where, when and why brain activation differs for bilinguals and monolinguals during picture naming and reading aloud. *Cerebral Cortex*, *22*(4), 892–902.

Perani, D., Farsad, M., Ballarini, T., Lubian, F., Malpetti, M., Fracchetti, A., ... Abutalebi, J. (2017). The impact of bilingualism on brain reserve and metabolic connectivity in Alzheimer's dementia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(7), 1690–1695.

Pliatsikas, C., Johnstone, T., & Marinis, T. (2014). Grey matter volume in the cerebellum is related to the processing of grammatical rules in a second language: A structural voxel-based morphometry study. *The Cerebellum*, *13*(1), 55–63.

Pliatsikas, C., Moschopoulou, E., & Saddy, J. D. (2015). The effects of bilingualism on the white matter structure of the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(5), 1334–1337.

Qi, Z., Han, M., Garel, K., San Chen, E., & Gabrieli, J. D. E. (2015). White-matter structure in the right hemisphere predicts Mandarin Chinese learning success. *Journal of Neurolinguistics*, *33*, 14–28.

Ressel, V., Pallier, C., Ventura-Campos, N., Díaz, B., Roessler, A., Ávila, C., & Sebastián-Gallés, N. (2012). An effect of bilingualism on the auditory cortex. *Journal of Neuroscience*, *32*(47), 16597–16601.

Román, P., González, J., Ventura-Campos, N., Rodríguez-Pujadas, A., Sanjuán, A., & Ávila, C. (2015). Neural differences between monolinguals and early bilinguals in their native language during comprehension. *Brain and Language*, *150*, 80–89.

Rossi, E., Cheng, H., Kroll, J. F., Diaz, M. T., & Newman, S. D. (2017). Changes in white-matter connectivity in late second language learners: Evidence from diffusion tensor imaging. *Frontiers in Psychology*, *8*, 2040.

Sadato, N. (2005). How the blind "see" Braille: Lessons from functional magnetic resonance imaging. *The Neuroscientist*, *11*(6), 577–582.

Sagi, Y., Tavor, I., Hofstetter, S., Tzur-Moryosef, S., Blumenfeld-Katzir, T., & Assaf, Y. (2012). Learning in the fast lane: New insights into neuroplasticity. *Neuron, 73*(6), 1195–1203.

Schlegel, A. A., Rudelson, J. J., & Tse, P. U. (2012). White matter structure changes as adults learn a second language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(8), 1664–1670.

Schweizer, T. A., Ware, J., Fischer, C. E., Craik, F. I. M., & Bialystok, E. (2012). Bilingualism as a contributor to cognitive reserve: Evidence from brain atrophy in Alzheimer's disease. *Cortex*, *48*(8), 991–996.

Shtyrov, Y., Nikulin, V. V., & Pulvermüller, F. (2010). Rapid cortical plasticity underlying novel word learning. *Journal of Neuroscience*, *30*(50), 16864–16867.

Starkey, M. L., & Schwab, M. E. (2014). How plastic is the brain after a stroke? *The Neuroscientist*, *20*(4), 359–371.

Stein, M., Federspiel, A., Koenig, T., Wirth, M., Strik, W., Wiest, R., … Dierks, T. (2012). Structural plasticity in the language system related to increased second language proficiency. *Cortex*, *48*(4), 458–465.

Veroude, K., Norris, D. G., Shumskaya, E., Gullberg, M., & Indefrey, P. (2010). Functional connectivity between brain regions involved in learning words of a new language. *Brain and Language*, *113*(1), 21–27.

Wang, Y., Sereno, J. A., Jongman, A., & Hirsch, J. (2003). fMRI evidence for cortical modification during learning of Mandarin lexical tone. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(7), 1019–1027.

Wong, P. C. M., Warrier, C. M., Penhune, V. B., Roy, A. K., Sadehh, A., Parrish, T. B., & Zatorre, R. J. (2007). Volume of left Heschl's gyrus and linguistic pitch learning. *Cerebral Cortex*, *18*(4), 828–836.

Woumans, E., Santens, P., Sieben, A., Versijpt, J. A. N., Stevens, M., & Duyck, W. (2015). Bilingualism delays clinical manifestation of Alzheimer's disease. *Bilingualism: Language and Cognition*, *18*(3), 568–574.

Xiang, H., Dediu, D., Roberts, L., van Oort, E., Norris, D. G., & Hagoort, P. (2012). The structural connectivity underpinning language aptitude, working memory, and IQ in the Perisylvian language network. *Language Learning*, *62*(s2), 110–130.

Xu, M., Baldauf, D., Chang, C. Q., Desimone, R., & Tan, L. H. (2017). Distinct distributed patterns of neural activity are associated with two languages in the bilingual brain. *Science Advances*, *3*(7), e1603309.

Yang, J., & Li, P. (2012). Brain networks of explicit and implicit learning. *PloS One*, *7*(8), e42993.

Yang, J., Gates, K. M., Molenaar, P., & Li, P. (2015). Neural changes underlying successful second language word learning: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics*, *33*, 29–49.

Zou, L., Ding, G., Abutalebi, J., Shu, H., & Peng, D. (2012). Structural plasticity of the left caudate in bimodal bilinguals. *Cortex*, *48*(9), 1197–1206.

Zhang, Y., Kuhl, P. K., Imada, T., Iverson, P., Pruitt, J., Stevens, E. B., … Nemoto, I. (2009). Neural signatures of phonetic learning in adulthood: A magnetoencephalography study. *NeuroImage*, *46*(1), 226–240.

Second language learning and brain plasticity

CHENG Kai-Wen[1,2]; DENG Yan-Hui[3]; YAN Hong-Mei[1]

([1] *Key Laboratory for NeuroInformation of Ministry of Education, School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 610054, *China*)

([2] *School of Foreign Languages, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 611756, *China*)

([3] *Department of Foreign languages, Chengdu Technological University, Chengdu* 611730, *China*)

Abstract: Brain plasticity refers to any functional change or structural reconfiguration of the brain triggered by environmental stimulation, cognitive demands and behavior experience. About a decade of research with bilingualism and language training shows that, whether we are the young or the old, long-term or short-term L2 learning can influence our brain's functional pattern as well as its corresponding anatomical changes. Included are the increased volume of gray matter (GM) and density of white matter (WM) as well as the reorganization of neural networks. Long-time and continuous L2 learning will promote functional executive control and its neural underpinnings, which may protect neural reserve against aging. Based on brain plasticity, cross-sectional and longitudinal studies involved are compared and the mechanism of how both functional and structural changes occur in the brain as a function of L2 learning is discussed. Additionally, some suggestions are presented for future exploration.

Key words: L2 learning; brain plasticity; bilingual effect; language training